

Article

« Répartition spatiale de l'influence de l'ENSO sur les précipitations annuelles en Équateur »

F. Rossel, P. Le Goulven et E. Cadier

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 12, n° 1, 1999, p. 183-200.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705348ar>

DOI: 10.7202/705348ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Répartition spatiale de l'influence de l'ENSO sur les précipitations annuelles en Équateur

Areal distribution of the influence of ENSO on the annual rainfall in Ecuador

F. ROSSEL^{1*}, P. LE GOULVEN² et E. CADIER³

Reçu le 11 juillet 1997, accepté le 19 août 1998**.

SUMMARY

The influence of ENSO (El Niño/Southern Oscillation) on rainfall has been studied in numerous regions of the world and especially in South America. Ecuador, located between Peru and Colombia, is one of the regions most affected by this phenomenon. This country has been little studied and this part of the world remains undefined in global studies due to lack of data. We propose to fill this gap by homogenization of rainfall series from 210 stations spread between the coastal regions, the Andes and the Amazonian slope of Ecuador. This study was carried out with the regional vector method of BRUNET-MORET (1979), based on the hypothesis of pseudo-proportionality between the total rainfall of the stations located in a homogeneous area. This method also allowed us to regionalize the annual rainfall and thus to define 18 homogeneous areas in which the inter-annual variations are represented by a rainfall index. This zoning differs from previous ones (POURRUT, 1994) in that the parameter determining the regionalization is the chronological evolution of total rainfall and not the mean rainfall values. This approach is the most appropriate for the analysis of annual rainfall evolution. The available data permit the calculation of these indices in a continuous way for the 30-year period between 1964 and 1993, the annual cycle considered being the hydrological year that begins in September and finishes in August of the following year.

We propose a simple numeric method to identify the various El Niño events considered as the regional consequence in South America of the global ENSO phenomenon. We consider that an El Niño event corresponds to a sequence of at least three consecutive months during which the monthly sea surface tempe-

1 ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, BP 5045, 34032 Montpellier cedex, France. Adresse actuelle : GRL-ARS-USDA, 7207 West Cheyenne Street, El Reno, OK 73036, USA.

2 ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, BP 5045, 34032 Montpellier cedex, France.

3 ORSTOM, AP 17 11 06596, Quito, Équateur.

* Correspondance. e-mail : rossel@grl.ars.usda.gov

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 septembre 1999.

perature (SST) of a Niño 1+2 block is superior to 23 °C and presents a positive anomaly of more than 1°C (ROSSEL, 1997). In the period 1964-1993, the years 1965, 1969, 1972, 1973, 1976, 1983, 1987 and 1992 correspond to this definition. The observed rainfalls during the El Niño of 1983 are exceptional, and taking them into account would mask the influence of the other events. We thus studied the year 1983 separately and removed it from the global analysis.

We analyzed and quantified the influence of El Niño on rainfall using two simple methods and two statistical tests that allowed us to demonstrate the link between the annual rainfalls and El Niño or the SST of the eastern Pacific. For this, we first examined the coincidence between the Niño years and years with rainfall surpluses. Then we determined the differences between the average annual rainfall totals of the Niño and normal years within the 18 zones. This difference, expressed in millimeters, affords an appreciation of the quantity of rainfall associated on average with El Niño. Expressed in percentage, it yields an estimate of the importance of the event compared to the normal rainfall. Using an ascending classification of the rainfall indices and of the SST of the Niño 1+2 block, we grouped the rainfall zones according to the similarities between their inter-annual variation and determined which zones were best related to the SST variation of eastern Pacific and thus linked to El Niño. We finished by a principal component analysis of the annual rainfall indices in order to group the indices with respect to the similarity between their inter-annual variability and their sensitivity to ENSO. The comparison and synthesis of these analyses allowed us to divide Ecuador into three regions. ENSO has a strong influence on the annual rainfalls in the majority of the Ecuador coastal zone included between Esmeraldas in the north (1°N) and Peru in the south. On the other hand, there is no direct link between ENSO and total rainfall in the inter-Andean and Amazonian slope regions. Finally, the western slopes of the Andes, the northern coastal regions and the eastern slope of the coastal range represent a transition area influenced by ENSO, but to a lesser extent than the rest of the coastal regions.

Key-words: ENSO, rainfall, influence, Ecuador.

RÉSUMÉ

L'influence de l'ENSO (El Niño/Southern Oscillation) sur les précipitations a fait l'objet de nombreuses études dans différentes régions de la planète et de l'Amérique du Sud en particulier. L'Équateur, situé entre le Pérou et la Colombie, est particulièrement touché par ce phénomène, mais les limites précises de son influence sont encore mal connues. L'homogénéisation des séries pluviométriques de 210 stations réparties entre les régions côtières, la cordillère des Andes et le versant amazonien de l'Équateur nous a permis de la préciser.

Cette critique a été réalisée à l'aide de la méthode du vecteur régional et a été complétée par une régionalisation de la pluviométrie annuelle qui a permis de définir 18 zones homogènes à l'intérieur desquelles les variations inter-annuelles de la pluie sont représentées par un indice pluviométrique qui a pu être déterminé sur la période 1964-1993. Les événements ENSO de cette période sont identifiés à partir de la série de température superficielle de la mer (TSM) du bloc Niño 1+2 grâce à une méthode numérique simple.

Nous avons analysé et quantifié l'influence de l'El Niño sur les précipitations à l'aide de deux méthodes simples et de deux tests statistiques qui permettent de mettre en évidence le lien entre les précipitations annuelles et l'El Niño ou la TSM du Pacifique oriental. Nous avons examiné dans un premier temps la coincidence entre les années Niño et les années de pluviométrie excédentaires. Puis, nous avons déterminé les différences entre les moyennes des totaux pluviométriques annuels des années Niño et normales des dix-huit zones. Une

classification hiérarchique ascendante des indices pluviométriques et de la TSM du bloc Niño 1+2 permet ensuite de regrouper les zones pluviométriques en fonction de la similarité entre leurs variations inter-annuelles et de déterminer lesquelles sont les plus proches des variations de la TSM du Pacifique oriental et donc liées à l'El Niño. Nous terminons par une analyse en composantes principales des indices pluviométriques annuels qui a également pour objectif de regrouper les indices en fonction de la similitude de leur variabilité inter-annuelle et de leur sensibilité à l'ENSO. La comparaison et la synthèse des résultats de ces analyses nous a permis de diviser l'Équateur en trois grandes régions, la première est caractérisée par une forte influence de l'ENSO sur les totaux pluviométriques annuels, à l'inverse de la troisième où l'influence n'est pas significative, la deuxième région est intermédiaire entre les deux autres.

Mots clés : ENSO, pluie, influence, régionalisation, Équateur.

1 – INTRODUCTION

L'influence de l'ENSO sur les précipitations a fait l'objet de nombreuses recherches depuis les années 1980 et l'événement exceptionnel de 1983. La relation entre les excès ou les déficits pluviométriques et l'occurrence ou non d'un ENSO a été étudiée sur la majorité des pays proches de l'océan Pacifique (FRANCOU et PIZARRO, 1985 ; MORLIÈRE et RÉBERT, 1986 ; ACEITUNO, 1988 ; ROGERS, 1988 ; KOUSKY et ROPELEWSKI, 1989 ; HASTENRATH, 1990 ; KAHYA et DRACUP, 1993 ; SIMPSON *et al.*, 1993), sur des régions plus éloignées comme l'Inde ou l'Afrique (HASTENRATH, 1988 ; KILADIS et VAN LOON, 1988 ; ELTAHIR, 1996) voir même sur l'ensemble de la planète (ROPELEWSKI et HALPERT, 1987 et 1996 ; KILADIS et DIAZ, 1989). Ces études montrent qu'au nord-ouest de l'Amérique du Sud, l'ENSO provoque des précipitations et des écoulements supérieurs à la normale sur la façade Pacifique du nord du Pérou (WAYLEN et CAVEIDES, 1986 ; TAPLEY et WAYLEN, 1990), alors qu'il se traduit généralement par un déficit sur le versant Caraïbe de la Colombie (BOCANEGRA et CAICEDO, 1994 ; ACEITUNO et GARREAUD, 1995).

La limite entre ces deux effets antagonistes est mal définie par manque d'études précises des données hydro-pluviométriques de l'Équateur (ROPELEWSKI et HALPERT, 1987 ; *figure 1*). Pourtant, ce pays situé entre la Colombie et le Pérou, est fortement soumis à l'influence de l'El Niño (JOHNSON, 1976 ; CEPAL, 1983 ; NOUVELOT et POURRUT, 1984). Le présent article se propose de combler cette lacune en déterminant l'influence de l'ENSO sur les précipitations de l'Équateur. Pour cela, nous avons homogénéisé les séries pluviométriques des régions côtières, de certaines vallées inter-andines et du versant amazonien. Cette critique a permis de définir des zones pluviométriques homogènes à l'intérieur desquelles les séries chronologiques annuelles et mensuelles des stations sont pseudo-proportionnelles (ROSSEL *et al.*, 1995). Les variations inter-annuelles des précipitations de chaque zone peuvent être représentées par un indice pluviométrique (BRUNET-MORET, 1979). Le calcul de ces indices régionaux continus sur la période 1964-1993 permet d'analyser l'influence de l'ENSO sur la pluviométrie annuelle des différentes régions de l'Équateur sur une période de 30 ans comprenant plusieurs événements.

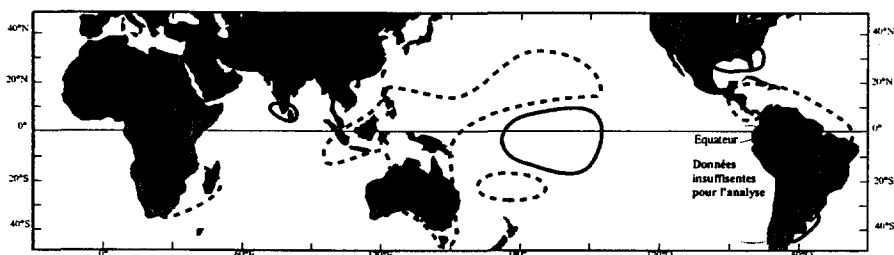


Figure 1 Schéma montrant les différentes régions où les précipitations sont supérieures à la normale (ligne continue) et inférieures (pointillés) pendant les événements ENSO (ROPELEWSKI et HALPERT, 1987, 1996). Nous remarquons que les auteurs n'ont pas traité le versant occidental de l'Amérique du sud où l'influence de l'ENSO est très importante par manque de données.

Chart showing the different regions where precipitations are superior to the normal (continuous line), and inferior (dotted) during the ENSO events (ROPELEWSKI et HALPERT, 1987, 1996). We notice that the authors did not process the western slope of South America, where the influence of ENSO is very important, because of lack of data.

2 – DONNÉES

2.1 Indices pluviométriques

Plusieurs études préliminaires ont montré que les précipitations des vallées inter-andines et du versant amazonien ne sont pas significativement influencées par l'El Niño (SÉMIOND, 1995 ; ROSSEL *et al.*, 1995) même durant l'événement exceptionnel de 1983 (NOUVELOT et POURRUT, 1984). Nous nous sommes donc principalement intéressés aux régions côtières, tout en conservant quatre vallées inter-andines et une région du versant amazonien pour confirmer cette hypothèse. Au total, 210 séries pluviométriques ont été homogénéisées, soit plus de 3 000 années/stations sur la période comprise entre 1964 et 1993 (ROSSEL *et al.*, 1995) : 52 % des séries sont de bonne qualité et sont de durée supérieure à 15 ans ; 32 % sont de bonne qualité mais sont de durée inférieure à 15 ans ; 16 % sont de qualité moyenne ou mauvaise et n'ont pas été utilisés pour le calcul des indices pluviométriques. L'homogénéisation des séries annuelles et mensuelles a été réalisée avec le logiciel CLIMAN (LE GOULVEN et ALEMÁN, 1991) qui permet d'utiliser la méthode du « vecteur régional » définie par BRUNET-MORET (1979). Cette méthode est basée sur le principe de pseudo-proportionnalité entre les totaux pluviométriques d'une zone homogène. À l'intérieur de chaque zone les séries chronologiques des stations peuvent être représentées par une seule série de valeurs : le vecteur régional. Les composantes de ce vecteur sont équivalentes à une moyenne pondérée des anomalies pluviométriques de chaque station (LE GOULVEN *et al.*, 1988). Dans un premier temps, la critique et la correction des séries de chaque station sont réalisées par comparaison avec le vecteur régional (LE GOULVEN et ALEMÁN, 1992). La délimitation postérieure des zones homogènes

nes est fonction du degré de proportionnalité entre stations et vecteur que l'on veut imposer. L'utilisation de cette méthode a permis de diviser le littoral de l'Équateur en treize zones pluviométriques homogènes (ROSSEL *et al.*, 1995). Ce zonage se différencie des antérieurs (POURRUT, 1994) par le fait que le paramètre déterminant de la régionalisation est l'évolution chronologique des totaux pluviométriques et non leur valeur moyenne. Cette approche est la plus appropriée à l'analyse de l'évolution de la pluviométrie annuelle. Nous disposons donc de dix-huit indices pluviométriques annuels continus sur la période 1964-1993, treize des régions côtières, quatre des vallées inter-andines et un du versant amazonien (figure 2). Les totaux annuels sont considérés en années hydrologiques qui pour l'Équateur sont du 1^{er} septembre au 31 août de l'année suivante, par exemple l'année 1965 correspond à la période comprise entre le 01/09/64 et le 31/08/65.

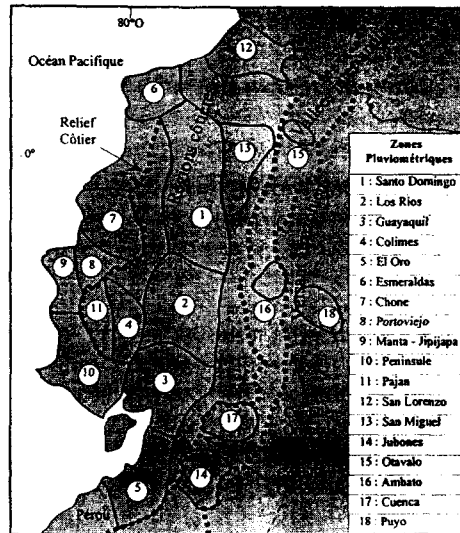


Figure 2 Zones pluviométriques et grand secteurs géographiques.
Rainfall zones and great geographical sectors.

2.2 Identification des années Niño

Comme QUINN (1993) ou ACEITUNO (1993), nous utilisons le terme **ENSO** pour désigner les anomalies atmosphériques et océaniques affectant l'intégralité de la planète et nous réservons **El Niño** à ses conséquences régionales qui se limitent au Pacifique tropical au large des côtes de l'Amérique du Sud. L'identification des années Niño a donné lieu à de multiples classifications pas toujours concordantes à cause de la complexité du phénomène et des différents critères retenus par les auteurs (QUINN *et al.*, 1978 et 1987 ; RASMUSSEN et CARPENTER, 1983 ; ROPELEWSKI et JONES, 1987). Cette diversité montre la nécessité d'utiliser une méthode d'identification spécifique à chaque région de la planète adaptée au problème posé. Nous recherchons un indice permettant de caractériser et si possible de prévoir les excès pluviométriques et les inondations sur les régions côtières de l'Équateur (ROSSEL *et al.*, 1996). En accord avec WAYLEN et CAVIEDES (1986), nous estimons qu'aucune variable hydrologique ou pluviométrique ne

peut être utilisée comme critère de sélection des années Niño pour étudier ensuite l'influence de ce même phénomène sur ces mêmes variables.

Aucune des méthodes d'identification proposées par les différents auteurs ne répond parfaitement à nos objectifs, nous avons donc recherché une méthode d'identification des El Niño simple qui utilise un indice du Pacifique oriental disponible en temps réel et qui corresponde aux caractéristiques générales du phénomène. BJERKNES (1969) et WYRTKI (1979) précisent que le début d'un El Niño est marqué par l'arrivée d'eaux chaudes au large des côtes de l'Amérique centrale et surtout au nord de l'Amérique du Sud. Le SCOR (Scientific Comity for Ocean Research) définit El Niño comme une anomalie de température superficielle de la mer (TSM) d'extension régionale au large de l'Amérique du Sud supérieure ou égale à un écart-type pendant une période de plusieurs mois à plus d'une année. L'analyse des séries des valeurs absolues et des anomalies de la TSM du bloc Niño 1+2 (80-90°W/0-10°S) nous a conduit à identifier un El Niño selon les critères suivants :

Un événement El Niño correspond à une séquence d'au moins trois mois consécutifs pendant laquelle la TSM mensuelle du bloc Niño 1+2 est supérieure à 23 °C et présente une anomalie positive supérieure à 1 °C.

Les valeurs de la TSM du bloc Niño 1+2 sont diffusées mensuellement depuis 1970 par le CAC (Climate Analysis Center) sur Internet. Pour la période 1964-1969, nous les avons calculées à partir des relevés de la ligne maritime n° 1 qui longe les côtes de l'Amérique du sud (Ship track 1, 4-12°S ; RASMUSSEN et CARPENTER, 1982) qui sont également donnés par le CAC. Ce calcul a été fait avec les régressions linéaires entre les valeurs mensuelles de ces deux variables déterminées sur la période 1970-1993 (R compris entre 0,95 et 0,98). La valeur de 1 °C retenue pour sélectionner les années Niño correspond à la valeur moyenne des écart-types mensuels de la période 1964-1993 (ROSSEL, 1997). Au cours de la période 1964-1993, huit séquences correspondent à cette définition (*figure 3*). Ces épisodes correspondent aux huit années hydrologiques suivantes : 1965, 1969, 1972, 1973, 1976, 1983, 1987, 1992. Elles correspondent avec les années Niño reconnues par la majorité des auteurs (RASMUSSEN et CARPENTER, 1983 ; QUINN, 1993).

3 – RÉSULTATS

De nombreux auteurs ont déjà tenté de déterminer les relations entre les précipitations de différentes parties de la planète et l'El Niño ou l'ENSO. La démarche que nous avons adoptée est en partie inspirée des méthodes utilisées par ces auteurs, mais fait aussi preuve d'originalité par l'utilisation de nouvelles méthodes permettant de mettre en évidence la distribution spatiale de l'influence de l'El Niño sur la pluviométrie annuelle de l'Équateur.

3.1 Cas du Niño de 1983

En 1983, 2 800 mm de pluie ont été enregistrés à Salinas (zone n° 10), alors que la moyenne des précipitations des 29 autres années de la période 1964-1993

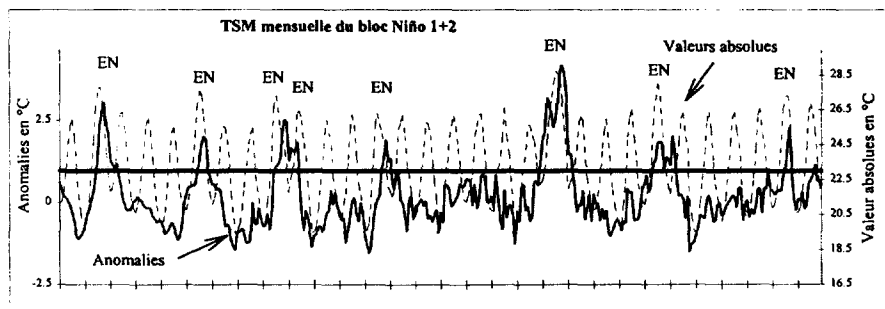


Figure 3 Valeurs absolues et anomalies mensuelles de la TSM du bloc Niño 1+2 de la période 1964-1993. La droite 1 °C/23 °C correspond au seuil en dessous duquel les anomalies et valeurs absolues de TSM doivent être pendant au moins 3 mois consécutifs pour que l'on soit en présence d'un Niño. Les périodes marquées EN correspondent aux El Niño.

Absolute values and monthly anomalies of SST of Niño 1+2 block along the 1964-1993 period. The straight line 1 °C/23 °C corresponds to the threshold below which the anomalies and the absolute values of SST must last at least 3 consecutive months to confirm the El Niño presence. The periods noted EN correspond to El Niño events.

est seulement de 200 mm, cette valeur représente 33 % du total des précipitations des 30 ans de la période d'étude. À Guayaquil, 4 560 mm ont été observés contre 1 060 mm en moyenne les autres années, etc. Sur les régions côtières de l'Équateur, l'année 1983 pourrait appartenir à une population statistique minoritaire d'événements exceptionnels. La prise en compte des précipitations extrêmement fortes enregistrées sur l'ensemble des régions côtières en 1983 biaiserait les ajustements statistiques réalisés sur une période relativement réduite de 30 ans qui considèrent que les événements sont issus d'une même population. Cette seule année masquerait également les anomalies provoquées par les autres événements, elle n'a donc pas été prise en compte dans les calculs réalisés pour cette étude.

3.2 Coïncidence entre années de pluviométrie excédentaire et années Niño

L'examen de la coïncidence entre les années Niño et les années de pluviométrie excédentaire indique de manière simple la liaison des totaux pluviométriques annuels au phénomène. Un total pluviométrique annuel est considéré excédentaire lorsque l'anomalie observée est supérieure à un demi-écart-type ($P - m > \sigma/2$, où P est le total observé, m la moyenne et σ l'écart-type de la période 1964-1993), il est considéré normal lorsque la valeur absolue de l'anomalie est inférieure à un demi-écart-type ($|P - m| < \sigma/2$) et déficitaire lorsque l'anomalie est négative et supérieure en valeur absolue à un demi-écart-type ($P - m < -\sigma/2$).

Les zones Santo Domingo (1) (figure 4a), Los Ríos (2), Guayaquil (3), Colimes (4), El Oro (5), Chone (7) et Manta-Jipijapa (9) présentent une réponse positive très marquée aux Niño. Le phénomène semble être la plus importante cause d'excédents pluviométriques annuels, les totaux excédentaires qui ne correspondent pas au phénomène sont généralement moins forts, ils ont été provoqués soit

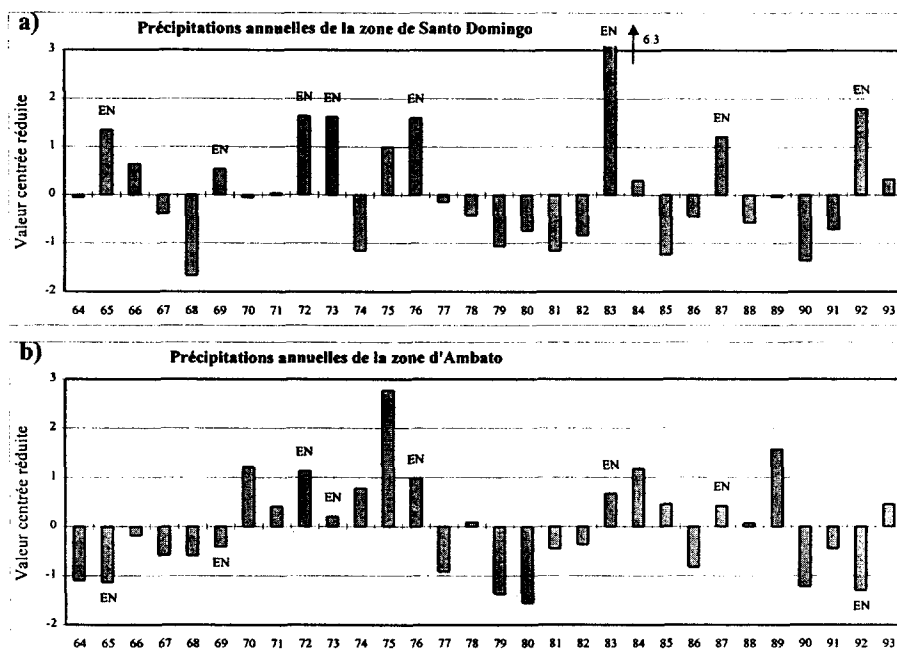


Figure 4

Valeurs centrées réduites des indices pluviométriques annuels des zones de Santo Domingo (a) et d'Ambato (b). Les années marquées EN correspondent aux années Niño. a) Les huit El Niño de la période 1964-1993 coïncident avec des excès pluviométriques. L'El Niño semble jouer un rôle prépondérant sur l'occurrence de précipitations excédentaires dans cette région. b) Trois El Niño correspondent à des excès, trois à des précipitations normales et deux à des déficits, on peut également observer des pluies excédentaires certaines années non-Niño. Les totaux pluviométriques annuels de cette zone ne semblent pas être liés à l'El Niño.

Standardized values of the annual rainfall indices of Santo Domingo (a) and Ambato (b) areas. The years noted EN correspond to El Niño years. a) The eight El Niño of the 1964-1993 period coincide with surplus rainfalls. El Niño seems to play an important part of the excess rainfall occurrence in the region. b) Three El Niño correspond to surplus, three to normal rainfall and two to deficit, we can also observe excess rainfalls occurring in years without El Niño. The annual rainfall of this area seems independent of El Niño.

par une activité ou un déplacement méridional de la zone de convergence inter-tropicale supérieurs à la normale, soit par des circulations locales ou d'autres phénomènes qui ne sont pas directement liés aux réchauffements anormaux de l'océan (POURRUT, 1994). Cette coïncidence est également marquée pour les zones de l'ouest et du sud de la côte mais de façon un peu moins évidente pour Portoviejo (8), Péninsule (10) et Pajan (11) où deux El Niño correspondent à des pluies normales et même trois pour Esmeraldas (6).

Pour les zones situées au nord-est de la côte (12 et 13), cette influence est plus faible, deux El Niño coïncident avec des pluies normales et un avec un déficit, alors que plusieurs années sont excédentaires sans être des années Niño, il est ici plus difficile d'affirmer que l'occurrence d'un Niño implique des précipita-

tions excédentaires. Parmi les zones étudiées de la cordillère des Andes et du versant amazonien, seule celle de Jubones (14) semble être un peu influencée par l'El Niño, sur les huit événements de la période 1964-1993, quatre correspondent à des pluies excédentaires, trois à des normales et un à des déficitaires. Le régime pluviométrique de cette zone, située dans une vallée inter-andine ouverte vers l'ouest, est lié au cycle saisonnier du littoral (le maximum de précipitation correspond à la saison des pluies de la côte) car cette zone est fortement influencée par les masses d'air océaniques. Par contre, les totaux pluviométriques annuels des zones d'Otavalo (15), d'Ambato (16) (*figure 4b*), de Cuenca (17) des vallées inter-andines et de Puyo (18) du versant amazonien n'ont pas de lien apparent avec l'occurrence d'un Niño. Cette analyse permet de réaliser une première division de l'Équateur ; il y a une forte coïncidence entre les années Niño et les totaux excédentaires des zones 1 à 11, il n'y a pas de tendance marqué sur les zones 15 à 18, pour les autres zones (12 à 14) il y a une légère coïncidence.

3.3 Différences entre les moyennes des années Niño et normales

La différence entre les moyennes des totaux des années Niño et normale permet de quantifier globalement les anomalies pluviométriques correspondant au Niño (*tableau 1*), elle permet de compléter de manière numérique le diagnostic émis précédemment. Exprimée en millimètres ($Moy_{Niño} - Moy_{normale}$) cette différence permet d'apprécier la quantité moyenne de précipitation apportée par le

Tableau 1 Différences entre les moyennes des précipitations des années Niño (1983 exclus) et normales exprimées en pourcentage et en millimètres.

Table 1 Differences between the mean rainfalls of Niño years (1983 expected) and normal ones, expressed in percentage and in millimeters.

N°	Zone	Précipitations moyennes de la période 1964-1993	Différence entre les moyennes des années Niño et des années normales	
			Exprimée en %	Exprimée en mm
1	Santo Domingo	2 700	43	1 048
2	Los Ríos	2 000	49	889
3	Guayaquil	1 400	80	967
4	Colimes	1 300	98	998
5	El Oro	800	71	496
6	Esmeraldas	2 000	41	724
7	Chone	1 000	46	441
8	Portoviejo	6 60	70	394
9	Manta-Jipijapa	3 60	85	256
10	Peninsula	2 60	177	316
11	Paján	1 100	43	424
12	San Lorenzo	3 300	23	724
13	San Miguel	3 000	13	388
14	Jubones	630	15	92
15	Otavalo	1 100	- 5	- 52
16	Ambato	590	0	1
17	Cuenca	820	- 4	- 36
18	Puyo	4 600	2	106

phénomène, exprimée en pourcentage ($100 \times (\text{Moy}_{\text{niño}} - \text{Moy}_{\text{normale}}) / \text{Moy}_{\text{normale}}$) elle traduit l'importance relative de l'anomalie. Ces anomalies sont significatives (différence $\geq 40\%$ et ≥ 250 mm) pour la majeure partie des régions côtières de l'Équateur (zones 1 à 11). Proportionnellement, elles sont maximum pour les régions semi-arides du sud-ouest (10) et se réduisent vers le nord-est (1, 6), alors que quantitativement elles sont plus importantes pour les zones de la plaine du Guayas (1, 2, 3, 4) où les précipitations moyennes sont les plus élevées. Au nord du littoral (12) où les précipitations moyennes sont les plus importantes, cette différence est supérieure à 700 mm mais elle ne représente plus que 23 % d'augmentation les années Niño. L'influence du phénomène sur les précipitations des zones 13 du versant occidental de la cordillère des Andes et 14 de la Sierra se traduit par une différence relativement faible d'environ 15 %. Pour les trois autres groupes de la Sierra (15, 16, 17) et celui du versant amazonien (18), les totaux annuels ne sont pas significativement différents les années Niño, les différences sont inférieures à 5 %.

3.4 Classification hiérarchique des indices pluviométriques

Nous avons complété ce zonage des totaux pluviométriques annuels en fonction de leur réponse à l'El Niño par une classification hiérarchique ascendante. Nous avons considéré les valeurs centrées réduites annuelles des dix-huit indices pluviométriques et de la TSM du bloc Niño 1+2 des 29 années de la période 1964-1993 (1983 exclu). La classification hiérarchique obtenue est représentée par le dendrogramme de la figure 5. Si l'on considère un niveau d'agrégation de 1, les indices des zones côtières sont regroupés en quatre partitions : la première correspond aux zones relativement humides comprises entre le versant ouest de la cordillère des Andes et les reliefs côtiers (1, 2, 3, 4, 6) ; la deuxième aux zones semi-arides proches de l'Océan Pacifique comprises entre la province du Manabí et le Pérou (5, 7, 8, 9, 10) ; la troisième aux zones situées sur le versant oriental du relief côtier et sur le versant occidental de la cordillère des Andes (11, 13) ; la dernière à la zone du nord (12).

L'influence de l'El Niño sur les précipitations des régions côtières est illustrée par un niveau d'agrégation entre la TSM du bloc Niño 1+2 et la partition des indices pluviométriques des zones du littoral de l'ordre de 3. L'absence d'influence sur les totaux des zones des vallées inter-andines et du versant amazonien est marquée par un niveau d'agrégation supérieur à 8. La différence majeure avec les analyses précédentes est due au rapprochement de la zone 14 des autres zones de la cordillère, mais le niveau d'agrégation est élevé ($\sim 1,5$) et donc peu significatif. Nous pouvons également remarquer que la zone 11 située sur le versant est du relief côtier se rapproche de la zone 13 situé sur le piémont occidental de la cordillère des Andes.

3.5 Analyse en composantes principales des indices pluviométriques

Afin de préciser les zones où les variations des totaux pluviométriques annuels sont similaires et liées à l'El Niño, nous avons réalisé une analyse en composantes principales. Les variables considérées sont les valeurs centrées réduites des indices pluviométriques annuels des dix-huit zones, les individus sont les années hydrologiques de 1964 à 1993 (1983 exclu).

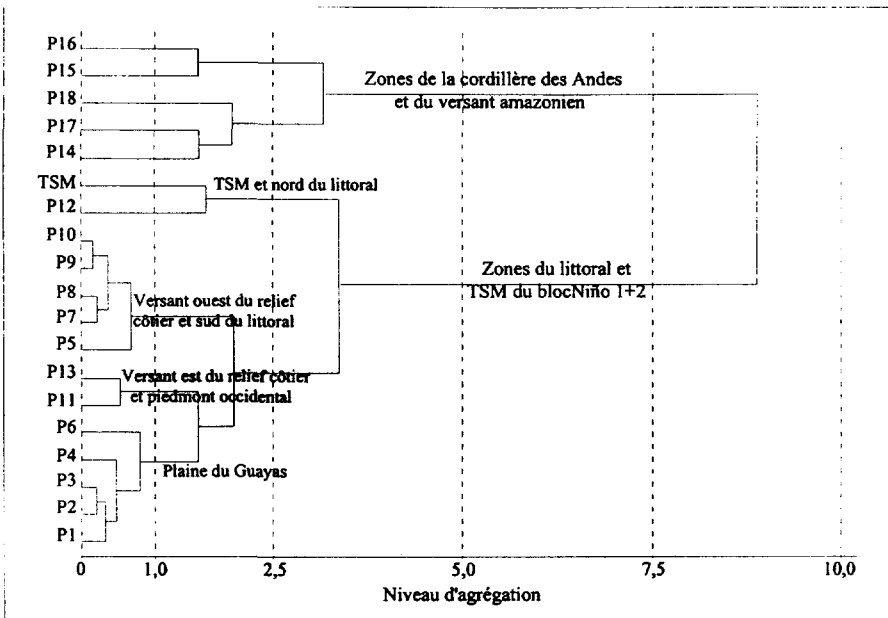


Figure 5 Arbre de la classification hiérarchique des dix-huit indices pluviométriques annuels et de la TSM annuelle moyenne du bloc Niño 1+2. La TSM du Pacifique oriental se rapproche de la partition des indices des zones de la côte.

Ascending classification tree of the eighteen annual rainfall indices and of the mean annual SST of the Niño 1+2 block. The SST of the eastern Pacific gets closer to the indices partition of the coastal areas.

3.5.1 Graphique des variables (figure 6b)

– La *première composante* explique 56,5 % de la variance totale, elle correspond à la variabilité des totaux pluviométriques des zones de la côte (1 à 10). Les indices de ces zones sont regroupés et constituent l'essentiel du poids du premier axe, leurs coordonnées sont par contre très faibles sur la deuxième composante.

– La *deuxième composante* explique 16,4 % de la variance, elle correspond à la variabilité des totaux des zones de la Sierra et du versant amazonien (14 à 18). Les indices de ces zones sont rassemblés et ont des coordonnées élevées sur la deuxième axe.

– La zone de Pajan (11) située sur le versant est du relief côtier, celle de San Lorenzo (12) située au Nord des régions côtières et celle de San Miguel (13) située sur le piémont occidental sont intermédiaires entre les deux regroupements.

3.5.2 Graphique des individus (figure 6b)

– L'examen des séries pluviométriques montre que les années qui ont des coordonnées positives sur la *première composante* sont excédentaires sur la majorité des régions côtières et celles qui ont des coordonnées négatives sont déficitaires sur ces mêmes régions.

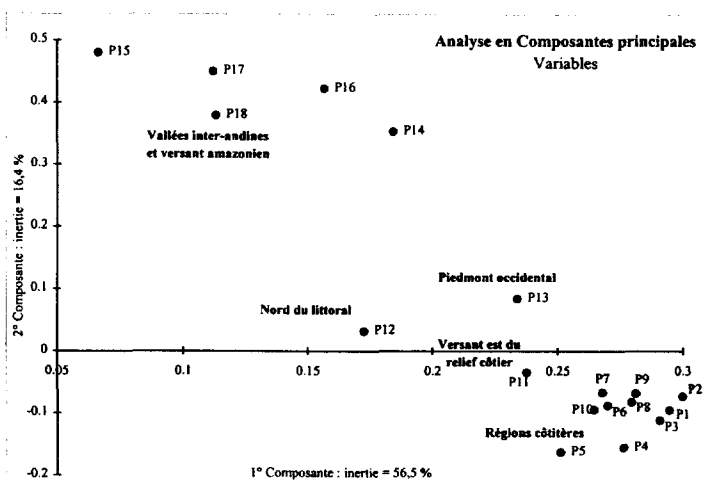


Figure 6a

Analyse en composantes principales, variables actives : indices pluviométriques de l'Équateur. La première composante correspond aux zones des régions côtières, la deuxième composante aux zones des vallées inter-andines et du versant amazonien.

Principal component analysis, active variables : rainfall indices of Ecuador. The first component correspond to the coastal region areas, the second component to the areas of inter-andean valleys, and the amazonian slope.

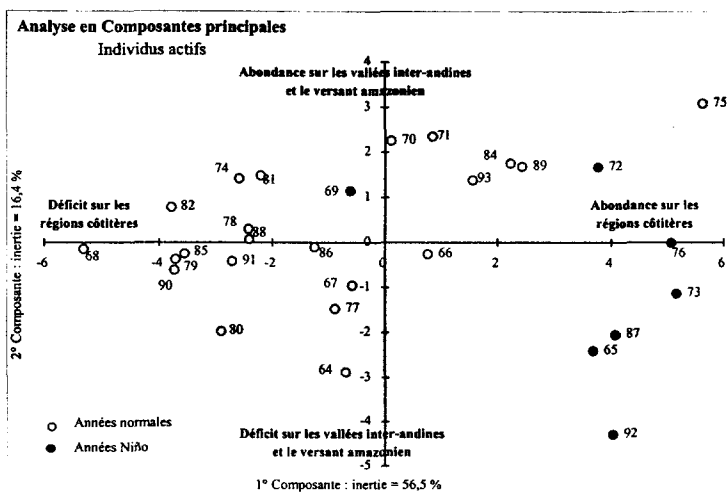


Figure 6b

Analyse en composantes principales, individus actifs : années de la période 1964-1993, 1983 exclu. À l'exception de 1969, toutes les années Niño ont des coordonnées positives sur la première composante qui correspond à la variance des totaux pluviométriques annuels des régions côtières.

Principal component analysis, active individuals : years of the 1964-1993 period, except 1983. Except 1969, all the Niño years have positive coordinates on the first component that corresponds to the variance of the annual rainfall of the coastal regions.

– Sur le deuxième axe, les années qui ont des coordonnées positives sont excédentaires sur la majorité des zones des vallées inter-andine et de l'amazone, alors que celles qui ont des coordonnées négatives sont déficitaires.

3.5.3 Report des années Niño sur le graphique des individus (figure 6b)

– À l'exception de 1969 (année où de très fortes anomalies de vent du nord ont été observées), toutes les années Niño ont des coordonnées positives sur la première composante, ceci montre que cet axe correspond aussi au phénomène et donc que les excès pluviométriques des régions côtières sont fortement liés au Niño.

– Sur la deuxième composante, les coordonnées des années Niño sont variables, cet axe est donc indépendant du phénomène, les totaux pluviométriques des zones des vallées inter-andines et de l'Amazonie ne sont donc pas liés à l'El Niño.

– Nous pouvons également remarquer que l'année 1975 qui n'est pas une année Niño, a des coordonnées positives sur le premier axe. Effectivement la TSM du Pacifique oriental était inférieure à la normale pendant l'hiver boréal 1974-1975, cependant on a observé de fortes pluies sur l'ensemble des régions côtières. L'analyse de la position moyenne de la zone de convergence inter-tropicale a montré que celle-ci a eu une position méridionale supérieure à la normale pendant cette période (ROSSEL, 1997). Cette observation nous a emmenés à utiliser les anomalies de TSM et vent méridien et zonal pour expliquer les anomalies de pluie (ROSSEL *et al.*, 1998).

3.5.4 Les coordonnées des indices pluviométriques sur la première composante de cette ACP peuvent donc être considérées comme le lien des indices pluviométriques avec l'El Niño.

– Celles des indices des zones 1 à 10 de la côte sont comprises entre 0,25 et 0,30, les plus élevées sont celles des indices des zones de la plaine du Guayas les plus proches de la cordillère des Andes (1, 2, 3). Ces zones sont les plus fortement influencées par l'El Niño.

– Les indices de la zone du versant est du relief côtier (11) et de la zone du piémont occidental de la cordillère des Andes (13) ont des coordonnées moins importantes.

– Les coordonnées des autres indices sont plus faibles (0,06 à 0,18), parmi celles-ci, les plus élevées sont celles de la zone côtière la plus septentrionale (12) et de la vallée inter-andine exposée à l'ouest (14) ; la plus faible est celle de la zone des vallées inter-andines, située la plus au Nord (15).

4 – DISCUSSION

L'homogénéisation des séries pluviométriques des stations des régions côtières de l'Équateur, ainsi que de quatre vallées inter-andines et d'un secteur du versant amazonien, a permis de créer des indices pluviométriques continus sur la

période 1964-1993. Ces indices ont permis d'analyser pour la première fois sur une période comprenant plusieurs événements, l'influence de l'El Niño sur les précipitations annuelles de l'Équateur. La comparaison et la synthèse des différentes analyses réalisées permettent de diviser le pays en trois grands secteurs en fonction de l'influence de l'El Niño sur les totaux pluviométriques annuels (figure 7).

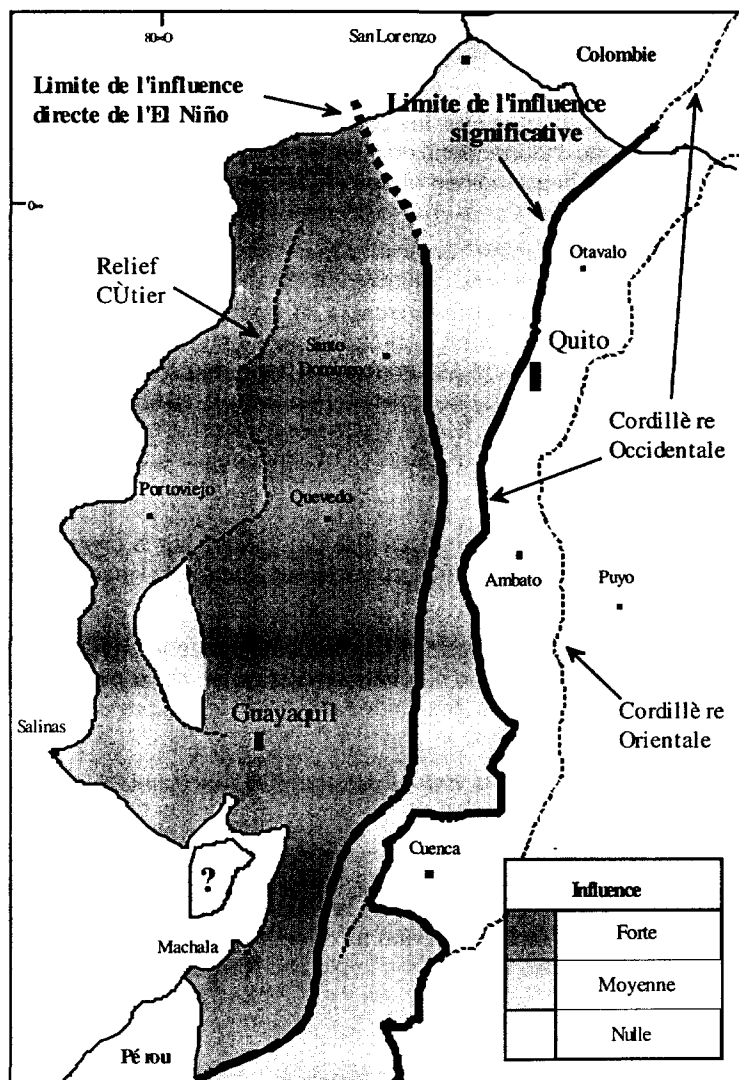


Figure 7 Influence de l'El Niño sur les précipitations annuelles de l'Équateur.
Influence of El Niño on the annual rainfall in Ecuador.

4.1 Secteur où la liaison entre les totaux pluviométriques annuels et l'El Niño est la plus forte

Il correspond à la majeure partie des régions côtières comprises entre Esmeraldas au nord et la frontière avec le Pérou au sud (zones 1 à 10). À l'exception de l'événement de 1969, les El Niño correspondent à des années dont les précipitations sont excédentaires. Les moyennes des précipitations des années Niño sont supérieures à celles des années non-Niño de 40 à 180 % et de 250 à plus de 1 000 mm. Cette différence augmente en pourcentage lorsque les totaux pluviométriques moyens sont faibles, en valeur absolue, elle est maximum pour les zones proches de la cordillère des Andes où les précipitations sont plus importantes. Le niveau d'agrégation de la TSM du bloc Niño 1+2 avec les partitions de ces zones est relativement faible, donc significatif. Toutes ces zones ont des coordonnées élevées sur la première composante de l'ACP, première composante qui correspond à l'occurrence ou non d'un événement Niño.

4.2 Secteur où la liaison existe mais plus faiblement

Il correspond au versant est du relief côtier (11), à la région côtière septentrionale (12), au versant occidental de la cordillère des Andes (13) et à la vallée inter-andine soumise à l'influence directe des masses d'air océaniques (14). Les années dont la pluviométrie est excédentaire correspondent la plupart du temps à des années Niño, mais ce n'est pas l'unique phénomène à l'origine de pluies abondantes. De plus, quelques El Niño peuvent correspondre à des précipitations normales ou déficitaires. Les différences entre les moyennes des années Niño et normales ne sont que de 20 à 30 %. Le niveau d'agrégation de la TSM du bloc Niño 1+2 avec les partitions de ces zones est toujours significatif. Les coordonnées des indices de ces zones sur la première composante de l'ACP sont plus faibles. Les stations de la zone Jubones (14) sont situées à plus de 1 500 m sur le versant occidental de la cordillère des Andes au Sud du pays, la zone de San Miguel (13) est dans une situation voisine au nord du pays à des altitudes légèrement inférieures, nous pouvons supposer que l'ensemble des régions situées à plus de 1 000-1 500 m d'altitude sur le versant occidental sont soumises à une influence modérée de l'El Niño. Cette supposition a pu être vérifiée pour quelques stations isolées, mais il existe peu d'information pour ces régions très accidentées et très peu habitées.

4.3 Secteur où il n'y a pas de liaison

Il correspond à la zone du versant amazonien (18) et aux zones des vallées inter-andines qui ne sont pas directement influencées par les masses d'air du Pacifique (15, 16 et 17). La cordillère des Andes joue ici un rôle de barrière qui limite fortement les échanges entre ses versants ouest et est. Certaines années Niño correspondent à des années dont les totaux pluviométriques sont excédentaires, d'autres à des pluies normales et d'autres encore à des déficits. De plus, des précipitations supérieures à la moyenne sont observées de nombreuses années normales. Il n'y a pas de différence notable entre les moyennes des années Niño et normales. Le niveau d'agrégation de la partition de ces zones avec la TSM du bloc Niño 1+2 est très élevé, donc non-significatif. Les coordonnées de ces zones sont faibles sur le premier axe de l'ACP qui est liée à l'El Niño, mais sont élevées sur la deuxième composante qui est indépendante de l'El Niño.

4.4 En résumé

L'El Niño a une forte influence sur les précipitations annuelles de la majorité des régions côtières de l'Équateur. Il n'apparaît pas de lien direct entre l'El Niño et les totaux des vallées inter-andines et du versant amazonien. Les flancs occidentaux de la cordillère des Andes, le Nord des régions côtières et le versant est du relief côtier constituent une zone de transition influencée par l'El Niño mais de façon beaucoup moins nette que le reste des régions côtières. Cette étude a donc permis de déterminer la limite de l'influence directe de l'ENSO sur les précipitations annuelles en Équateur, elle correspond aux reliefs de la cordillère des Andes à l'est et se situe entre Esmeraldas et San Lorenzo au nord à approximativement un degré de latitude nord.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement l'institut national équatorien de météorologie et d'hydrologie (INAMHI) pour sa collaboration lors de la collecte et de la critique des données pluviométriques. Nous remercions également toute l'équipe du projet INSEQ que nous associons à cette publication.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACEITUNO P. (1988). On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector, part 1 : Surface climate. *Monthly Weather Review*, 116, 505-524.
- ACEITUNO P. (1993). El Niño, l'oscillation australe et ENSO : des noms qui pretent à confusion pour une interaction complexe entre l'océan et l'atmosphère. *La Météorologie*, 8(3), 44-48.
- ACEITUNO P., GARREAUD R. (1995). Impacto de los fenómenos el Niño y la Niña en regímenes fluviométricos andinos. *Revista de la sociedad chilena de ingeniería hidráulica*, 33-43.
- BJERKNES J.H. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 97, 163-172.
- BOCANEGRA M., CAICEDO P. (1994). Características climáticas relevantes durante la ocurrencia de fenómenos ENOS en el Nor-Occidente sudamericano. *HIMAT*, 40 p.
- BRUNET-MORET Y. (1979). Homogénéisation des précipitations. *Cahier ORSTOM, série Hydrologie*, 16(3-4), 147-170.
- CEPAL. (1983). Los desastres naturales de 1982-1983 en Bolivia, Ecuador y Perú. Naciones Unidas - Consejo Económico y Social - Comisión Económica para América Latina. 227 p.
- ELTAHIR E. (1996). El Niño and the natural variability in the flow of the Nile River, *Water Resources Research*, 32(1), 131-137.
- FRANCOU B., PIZARRO L. (1985). El Niño y la sequía en los altos Andes centrales (Perú y Bolivia). *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 14(1-2), 1-18.
- HASTENRATH S. (1988). Prediction of India monsoon rainfall : Further exploration. *Journal of Climate*, 1, 298-304.
- HASTENRATH S. (1990). Diagnostic and prediction of anomalous river discharge in Northern South America. *Journal of Climate*, 3, 1080-1096.

- JOHNSON A.M. (1976). The climate of Peru, Bolivia and Ecuador. In *World Survey of Climatology, Vol 12: Climates of Central and South America*, Elsevier Scientific Pub. Co., 12, 169-172.
- KAHYA E., DRACUP J. (1993). U.S. Stream-flow patterns in relation to the El Niño/Southern Oscillation, *Water Resources Research*, 29(8), 2491-2503.
- KILADIS G., DIAZ H. (1989). Global climate anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation, *Journal of Climate*, 2, 1069-1090.
- KILADIS G., VAN LOON H. (1988). The southern oscillation. Part VII : Meteorological anomalies over the indian and pacific sectors associated with the extremes of the oscillation. *Monthly Weather Review*, 116, 120-136.
- KOUSKY V., ROPELEWSKI C. (1989). Extremes in the Southern Oscillation and their relationship to precipitation anomalies with emphasis on the South American region. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 4(2), 351-363.
- LE GOULVEN P., ALEMÁN M. (1991). Logiciel CLIMAN (Climatic monthly analysis) de traitement des données contenues dans la banque hydroclimatique BHIME. *FITADE, INERHI-ORSTOM*. 10 p.
- LE GOULVEN P., ALEMÁN M. (1992). Régionalisation climatique (pluie et ETP) dans les Andes équatoriennes, méthodologie, résultats et application. In *Régionalisation en hydrologie, Application au développement*, 8^e Journées hydrologiques de l'ORSTOM, 59-83.
- LE GOULVEN P., ALEMÁN M., ORSONO I. (1988). Homogeneización y regionalización pluviométrica por el metodo del vector regional. 5^o Congreso equatorien d'hydraulique, AEHID/CICP, Quito, 59-83.
- MORLIÈRE A., RÉBERT J.-P. (1986). Rainfall shortage and El Niño/Southern Oscillation in New Caledonia, Southwestern Pacific. *Monthly Weather Review*, 114, 6, 1131-1137.
- NOUVELOT J.-F., POURRUT P. (1984). El Niño, phénomène océanique et atmosphérique. Importance en 1982-1983 et impact sur le littoral équatorien. *Cahier ORSTOM, série Hydrologie*, 21(1), 39-65.
- POURRUT P. (1994). Climat de l'Équateur. In *l'eau en Équateur, principaux acquis en hydroclimatologie*. ORSTOM éditions, 30-42.
- QUINN W. (1993). The large-scale ENSO event, the El Niño and other regional features. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 22(1), 13-34.
- QUINN W., NEAL V., ANTUNEZ de MAYOLO S. (1987). El Niño occurrences over the past four and a half centuries. *Journal of Geophysical Research*, 92, 14449-14461.
- QUINN W., ZOPF D., SHORT K., KUO YANG R. (1978). Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño, and Indonesian droughts. *Fisheries Bulletin*, 76, 663-678.
- RASMUSSEN E., CARPENTER T. (1982). Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*, 110, 354-384.
- RASMUSSEN E., CARPENTER T. (1983). The relationships between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over India and Sri Lanka. *Monthly Weather Review*, 111, 517-528.
- ROGERS J. (1988). Precipitation variability over the Caribbean and tropical Americas associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 1, 172-182.
- ROPELEWSKI C., HALPERT M. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115, 1606-1626.
- ROPELEWSKI C., HALPERT M. (1996). Quantifying southern oscillation - precipitation relationships. *Journal of Climate*, 9, 1043-1059.
- ROPELEWSKI C., JONES P. (1987). An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review*, 115, 2161-2165.
- ROSSEL F. (1997). Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l'Équateur. *Université de Montpellier II, Thèse de doctorat*, 280 p + Annexes.
- ROSSEL F., CADIER E., GOMEZ G. (1996). Las inundaciones en la zona costera ecuatoriana : mecanismos responsables, obras de protección existentes y previstas. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 25(3), 399-420.
- ROSSEL F., CADIER E., CALVEZ R., LUGO C., GARCIA F. (1998). Prévission des précipitations dans la région de Guayaquil.

- Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 27(3), 8 p.
- ROSSEL F., SEMIOND H., CLAIRET S. (1995). Régionalisation de la pluviométrie annuelle de l'Équateur pour l'étude de l'impact de l'ENSO sur les régimes pluviométriques. *ORSTOM – INAMHI*, 56 p.
- SEMIOND H. (1995). Régionalisation des pluies en Équateur et estimation des excès pluviométriques en relation avec les événements « El Niño ». *École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy*. 23 p.
- SIMPSON H., CANE M., HERCZEG A., ZEBIAK S., SIMPSON J. (1993). Annual river discharge in southeastern Australia related to El Niño-Southern Oscillation forecasts of sea surface temperatures. *Water Resources Research*, 29(11), 3671-3680.
- TAPLEY T., WAYLEN P. (1990). Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru. *Hydrological Sciences Journal*, 35(4), 429-446.
- WAYLEN P., CAVIEDES C. (1986). El Niño and annual floods on the north Peruvian littoral. *Journal of Hydrology*, 89, 141-156.
- WYRTKI K. (1979). El Niño. *La Recherche*, 106(10), 1212-1220.